

УДК 620.179.16: 620.179.17

С. Ю. ПЛЕСНЕЦОВ**НОВІ МЕТОДИ КОНТРОЛЮ ТВЕРДОСТІ ПОВЕРХНЕВИХ ШАРІВ
ЗМІЦНЕНИХ МЕТАЛОВИРОБІВ**

Визначено, що значно підвищити експлуатаційні можливості виробів, конструкцій тощо можливо за рахунок зміцнення поверхневих та внутрішніх об'ємів матеріалів. Вказано, що при вимірюваннях твердості класичними методами пошкоджується поверхня виробу, внаслідок чого похибка вимірювання досягає значних величин, оскільки твердість визначається локально. Одним з перспективних методів неруйнівного контролю твердості поверхні виробів може бути електромагнітно-акустичний метод з використанням ультразвукових поверхневих хвиль. Метою роботи встановлено задачу розробки нових методів ультразвукового контролю твердості поверхневих шарів, які забезпечать підвищення точності вимірювань при високій продуктивності контролю. Для вирішення поставленої задачі розроблено метод ультразвукового контролю твердості металовиробів, який передбачає збудження в поверхневому шарі металовиробу та прийому імпульсів ультразвукових поверхневих коливань електромагнітно-акустичним способом за допомогою спеціальних перетворювачів. Структура розробленої системи включає в себе збуджувач перетворювач, приймаючий перетворювач та блок управління та обробки інформації. Розроблений метод включає в себе: калібрування контрольного приладу перед початком вимірювання, блок управління та обробки інформації формує управляючі сигнали для генератора, який збуджує в індукторі перетворювача імпульси високочастотного струму у вигляді пакету з заданою кількістю періодів заповнення вибраної частоти, через що в поверхневому шарі зразка збуджуються поверхневі коливання, які розповсюджуються в напрямку приймального перетворювача, який приймає імпульси хвиль Релея та після підсилення прийняті імпульси обробляються в блоці управління та обробки інформації. Розроблено та наведено конструкцію перетворювачів, часові схеми розгортки сигналу та технологію контролю металовиробів. Використання розробленого способу дозволяє підвищити продуктивність контролю при його високій точності і локальності.

Ключові слова: ультразвуковий контроль, електромагнітно-акустичний перетворювач, хвилі Релея, метод, модель, експериментальні дослідження, дефекти металу, металовироби.

С. Ю. ПЛЕСНЕЦОВ**НОВЫЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ТВЕРДОСТИ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ
УПРОЧНЕННЫХ МЕТАЛЛОИЗДЕЛИЙ**

Установлено, что значительно повысить эксплуатационные возможности изделий, конструкций и т.п. возможно за счет укрепления поверхностных и внутренних объемов материалов. Указано, что при измерениях твердости классическими методами повреждается поверхность изделия, вследствие чего погрешность измерения достигает значительных величин, поскольку твердость определяется локально. Одним из перспективных методов неразрушающего контроля твердости поверхности изделий может быть электромагнитно-акустический метод с использованием ультразвуковых поверхностных волн. Целью работы определена задача разработки новых методов ультразвукового контроля твердости поверхностных слоев, которые обеспечат повышение точности измерений при высокой производительности контроля. Для решения поставленной задачи разработан метод ультразвукового контроля твердости металлоизделий, предусматривающий возбуждения в поверхностном слое металлоизделия и приема импульсов ультразвуковых поверхностных колебаний электромагнитно-акустическим способом с помощью специальных преобразователей. Структура разработанной системы включает в себя возбуждающий преобразователь, принимающий преобразователь и блок управления и обработки информации. Разработанный метод включает в себя: калибровка контрольного прибора перед началом измерения, блок управления и обработки информации формирует управляющие сигналы для генератора, возбуждает в индукторе преобразователя импульсы высокочастотного тока в виде пакета с заданным количеством периодов заполнения выбранной частоты, из-за чего в поверхностном слое образца возбуждаются поверхностные колебания, которые распространяются в направлении приемного преобразователя, который принимает импульсы волн Рэлея и после усиления принятые импульсы обрабатываются в блоке управления и обработки информации. Разработан и приведен конструкцию преобразователей, временные схемы развертки сигнала и технологию контроля металлоизделий. Использование разработанного способа позволяет повысить производительность контроля при его высокой точности и локальности.

Ключевые слова: ультразвуковой контроль, электромагнитно-акустический преобразователь, волны Рэлея, метод, модель, экспериментальные исследования, дефекты металла, металлоизделия.

S. Yu. PLESNETSOV**NEW HARDNESS TESTING METHODS FOR SURFACE LAYERS OF STRENGTHENED
METAL PRODUCTS**

It was determined that in order to significantly improve the operational capabilities of products, structures, etc. is possible by strengthening the surface and internal volumes of materials. It is indicated that hardness measurements by classic methods the damage is inflicted to the surface of the product, and as a result the measurement error reaches significant values, since the hardness is determined locally. One of the promising methods of non-destructive testing of the surface hardness of products can be an electromagnetic-acoustic method using ultrasonic surface waves. The aim of the work is the task of developing new methods of ultrasonic testing of the hardness of surface layers, which will ensure an increase in measurement accuracy with high inspection performance. To solve this problem, a method of ultrasonic testing of the hardness of metal products has been developed, which provides for the excitation in the surface layer of a metal product and the reception of ultrasonic surface vibration pulses by an electromagnetic-acoustic method using special transducers. The structure of the developed system includes a stimulating converter, a receiving converter and an information control and processing unit. The developed method includes: calibration of the control device before the start of measurement, the control and information processing unit generates control signals for the generator, excites high frequency current pulses in the converter inductor in the form of a packet with a specified number of filling periods of the selected frequency, which is why in the surface layer of the sample surface oscillations are excited, which propagate in the direction of the receiving transducer, which receives pulses of Rayleigh waves and after amplification, the received and processed pulses are treated in the control unit and information processing. The design of the transducers, temporary signal sweep circuits and the technology of control of metal products were developed and presented. Using the developed method allows to increase the performance of the control with its high accuracy and locality.

Keywords: ultrasonic testing, electromagnetic-acoustic transducer, Rayleigh waves, method, model, experimental studies, metal defects, metal product.

Вступ. Значно підвищити експлуатаційні можливості виробів, конструкцій тощо можливо за рахунок зміцнення поверхневих та внутрішніх об'ємів матеріалів. Найчастіше оцінку зміцнення виробів виконують механічними методами Роквела, Брінеля та іншими [1]. При таких вимірюваннях пошкоджується поверхня виробу. Похибка вимірювання досягає значних величин, оскільки твердість визначається локально.

Покращити ситуацію можливо за рахунок використання неруйнівних методів контролю [2]. Одним з перспективних методів неруйнівного контролю твердості поверхні виробів може бути електромагнітно-акустичний (ЕМА) [3]. Типовий сучасний ЕМА-контрольний прилад наведено на рис. 1.



Рис. 1 – Сучасний ЕМА дефектоскоп

В даній роботі особлива увага приділяється реалізації ЕМА методу з використанням ультразвукових поверхневих хвиль (хвиль Релея).

Мета роботи. Розробити нові методи ультразвукового контролю твердості поверхневих шарів які забезпечать підвищення точності вимірювань при високій продуктивності контролю.

Основна частина. Для вирішення поставленої задачі розроблено метод ультразвукового контролю твердості металовиробу [3], який включає збудження в поверхневому шарі металовиробу імпульсів ультразвукових поверхневих коливань електромагнітно – акустичним способом за допомогою перетворювача, індуктор якого виконаний в формі «змійка» з встановленим кроком, прийом імпульсів ультразвукових поверхневих коливань перетворювачем, індуктор якого також виконаний у формі «змійка» з тим же кроком, калібрування контрольного приладу, сканування поверхні виробу, реєстрацію імпульсів, які пройшли ділянку поверхні виробу та визначення твердості металу виробу за результатами порівняння з калібрувальними даними, при цьому калібрування приладу проводять на зразках з відомою твердістю шляхом регулювання частоти збуджуючих ультразвукових хвиль Релея до отримання максимальної амплітуди прийнятих сигналів, визначають залежність значення твердості з визначеною частотою ультразвукових коливань, сканують металовироби з регулюванням частоти ультразвукових хвиль до отримання максимальної величини прийнятого сигналу, а твердість металовиробу визначають по відповідності виміряної частоти ультразвукових коливань твердості по визначеній калібрувальній залежності для даного матеріалу металовиробу.

На рис. 2 наведено спрощена блок-схема пристрою для реалізації запропонованого методу.

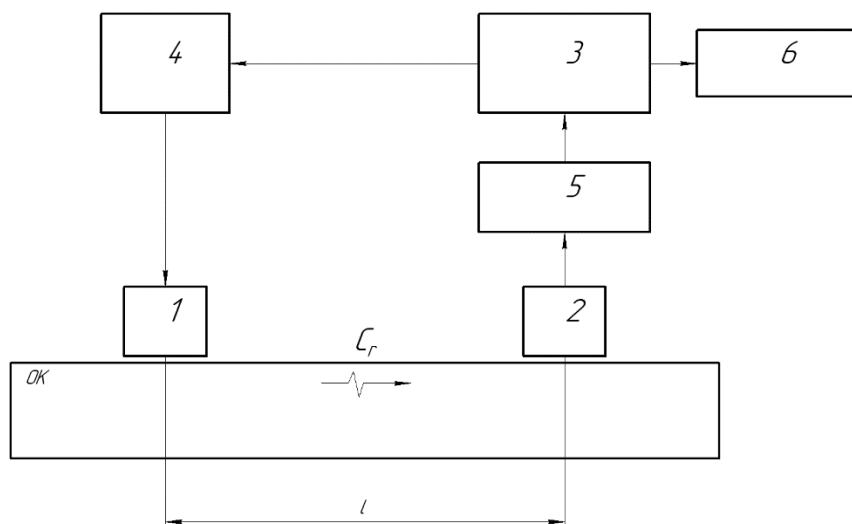


Рис. 2 – Блок-схема пристрою для реалізації розробленого способу ультразвукового контролю твердості металовиробу: 1 – збуджуючий перетворювач; 2 – приймаючий перетворювач; 3 – блок управління та обробки інформації; C_r – хвиля Релея; ОК – об'єкт контролю; l – відстань від збуджуючого до приймаючого перетворювача; 4 – генератор пакетних імпульсів; 5 – попередній підсилювач; 6 – блок візуалізації

На рис. 2 позначені: 1 – збуджуючий перетворювач; 2 – приймаючий перетворювач; 3 – блок управління та обробки інформації; C_r – хвиля Релея; ОК – об'єкт контролю; l – відстань від збуджуючого до

приймаючого перетворювача; 4 – генератор пакетних імпульсів; 5 – попередній підсилювач; 6 – блок візуалізації.

На рис. 3 наведено схематичне зображення і розташування індукторів збуджуючого та прийомного перетворювачів над поверхнею ОК

На рис. 3 позначені: 7 – індуктор збуджуючого ЕМА перетворювача; 8 – індуктор приймаючого ЕМА

перетворювача; a – крок перетворювачів (відстань між сусідніми провідниками ЕМА перетворювачів), яка дорівнює встановленій при калібруванні половині довжини хвилі Релея; l – відстань від збуджуючого до приймаючого перетворювача.

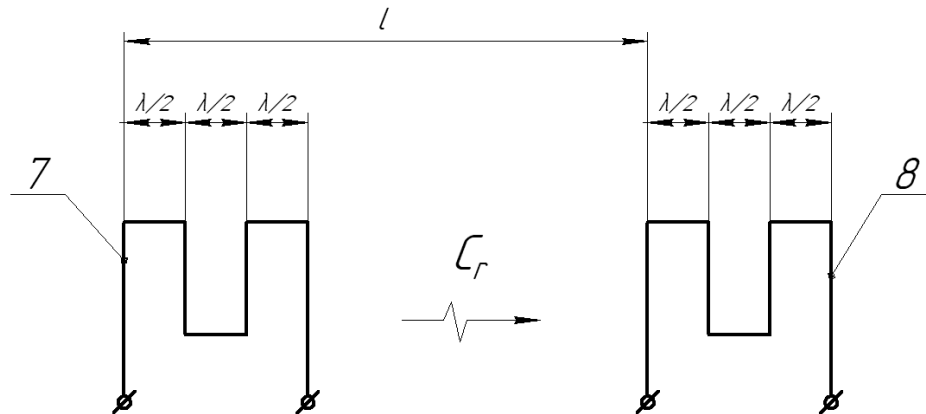


Рис. 3 – Індуктори ЕМА перетворювача при діагностиці твердості поверхні металовиробу:
7 – збуджуюча котушка; 8 – приймальна котушка

Метод реалізується наступним чином. Перед початком вимірювання проводять калібрування контрольного приладу. Для цього на поверхню контрольного зразка з відомою твердістю металу встановлюють на фіксованій відстані l збуджуючий ЕМА перетворювач 1 та приймаючий ЕМА перетворювач 2. Кроки індукторів приймаючого 8 та збуджуючого 7 ЕМА перетворювачів однакові і дорівнюють половині довжини хвилі Релея для вибраної частоти ультразвукових коливань. Блок 3 управління та обробки інформації формує управляючі сигнали для генератора 4. Генератор 4 збуджує в індукторі 7 перетворювача 1 імпульси високочастотного струму у вигляді пакету з заданою кількістю періодів заповнення вибраної частоти. В поверхневому шарі зразка збуджуються поверхневі коливання, які розповсюджуються в напрямку перетворювача 2. Перетворювач 2 приймає імпульси хвиль Релея. Після підсилення в блоці 5 прийняті імпульси оброблюються в блоці 3. Блок 3 з допомогою генератора 4 регулює частоту струму живлення індуктора 7 так, щоб на виході приймаючого перетворювача 2 з індуктором 8 амплітуда прийнятого сигналу була максимальною. При встановленій частоті половина довжини хвилі Релея буде відповідати кроку індукторів 1 та 2. Знайдене значення частоти співставляється з твердістю досліджуемого зразка. Процес калібрування повторюється на зразках з іншим значенням твердості контролюемого матеріалу. З результатами калібрування будується відповідна залежність, яка запам'ятовується в блоці 3.

Після калібрування виконується контроль ОК за аналогічною методикою. Знайдене значення частоти при максимальному значенні амплітуди прийнятого сигналу співставляється з залежністю, визначеною при калібруванні. Очевидно, що при такій методиці вимірювання на результати контролю не будуть впливати точність встановлення l та змін температури ОК.

Таким чином використання розробленого способу дозволяє підвищити точність контролю

твердості поверхневих шарів металовиробів.

Розширити можливості вищевказаного методу контролю твердості поверхневих шарів виробів можливо шляхом створення вдосконаленого методу ультразвукового контролю твердості поверхневих шарів металу протяжного виробу хвилями Релея, нове виконання якого дозволило б забезпечити підвищення продуктивності при високій точності і локальності контролю.

Для вирішення поставленої задачі методом [4], який включає калібрування контрольного приладу шляхом зондування зразка з відомою твердістю металу ультразвуковими імпульсами хвиль Релея, збудження в поверхневому шарі металу виробу імпульсів ультразвукових поверхневих коливань вздовж поверхні виробу, сканування поверхні виробу, реєстрацію імпульсів, які пройшли ділянку поверхні виробу та визначення твердості металу виробу за результатами аналізу часу розповсюдження ультразвукових імпульсів на ділянці виробу, при цьому збудження ультразвукових імпульсів проводять одним збуджуючим перетворювачем, а приймання імпульсів, які пройшли вздовж поверхні виробу, виконують n приймальними перетворювачами, розташованими послідовно на одній лінії в напрямку розповсюдження ультразвукових імпульсів від збуджуючого перетворювача, що встановлені на відстані l один від одного, при цьому перший, ближчий до збуджуючого перетворювача, приймаючий перетворювач розташовується на відстані l_1 , яка визначається за формулою

$$l_1 = (1, 2, \dots, 1, 5) \cdot C_r \cdot t_1,$$

де C_r – швидкість розповсюдження хвиль Релея, мм/мкс;

t_1 – загальний час дії зонduючого імпульсу та перехідних процесів в збуджуючому перетворювачі та елементах контрольного приладу, мкс,

l – відстань між сусідніми приймаючими перетворювачами встановлюють однаковою, її величина визначається за виразом

$$l > C_r \cdot t,$$

де C_r – швидкість розповсюдження хвиль Релея, мм/мкс;

t – тривалість імпульсу прийнятих хвиль Релея, мкс.

Значення величини l встановлюють при калібруванні контрольного приладу на зразку з відомою твердістю металу шляхом переміщення приймаючих перетворювачів таким чином, щоб різниця часу реєстрації кожного наступного прийнятого імпульсу була однаковою для моменту перетину величини амплітуди прийнятих імпульсів

через нульове значення, встановлюють контрольний прилад на об'єкт контролю і реєструють новий час перетину величини амплітуди прийнятих імпульсів через нульове значення для кожної пари приймаючих перетворювачів, а оцінку твердості металу ділянки виробу виконують по різниці часу, визначеної для кожної пари приймаючих перетворювачів відносно величини, отриманої на зразку з відомою твердістю металу, зміщують контрольний прилад вздовж виробу і повторюють процедуру контролю. Схема реалізації розробленого способу наведена на рис. 4.

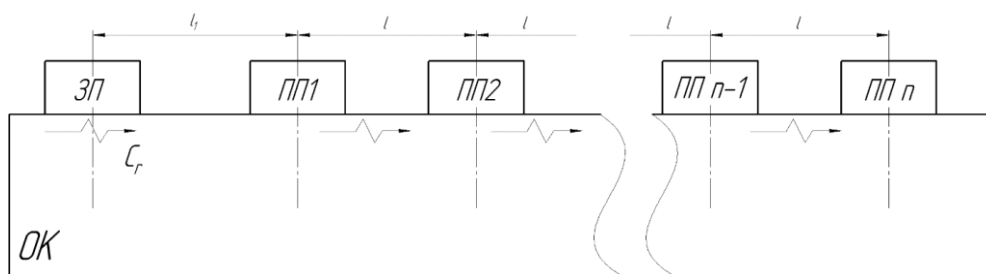


Рис. 4 – Схема розміщення ультразвукових перетворювачів для реалізації способу ультразвукового контролю твердості металу протяжного виробу імпульсами хвиль Релея

На рис. 4 позначені: ЗП – збуджуючий перетворювач; ПП1 ... ППn – приймаючі перетворювачі; C_r – хвиля Релея; ОК – об'єкт

контролю; l_1 – відстань від ЗП до ПП1; l – відстань між двома сусідніми приймаючими перетворювачами.

Часові параметри реалізації розробленого методу наведені на рис. 5.

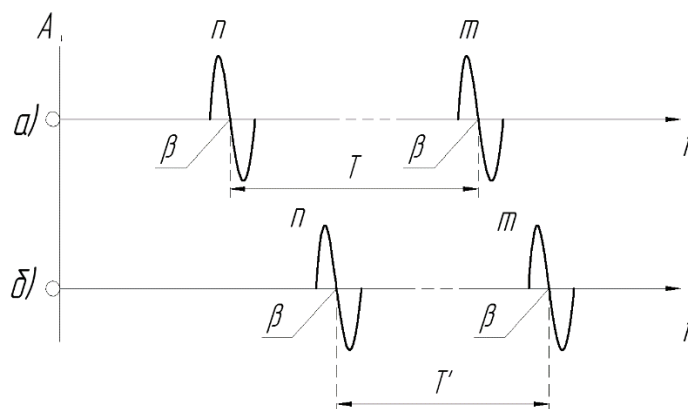


Рис. 5 – Часові розгортки з прийнятими n -тим і m -тим імпульсами хвиль Релея для зразка з відомою твердістю металу та з контрольованої ділянки поверхні виробу: а – для контрольного зразка; б – для контрольованого зразка

На рис. 5 позначені: а – часова розгортка з n -тим і m -тим імпульсами хвиль Релея для зразка з відомою твердістю металу; б – часова розгортка з n -тим і m -тим імпульсами хвиль Релея для металу поверхні контрольованого ОК; A – амплітуда прийнятих імпульсів; T – різниця часу між прийнятими n -тим і m -тим імпульсами для зразка з відомою твердістю металу; T' – різниця часу між прийнятими n -тим і m -тим імпульсами для металу поверхні контрольованого ОК B – точки переходу амплітуд прийнятих імпульсів через нуль.

Даний метод [5] реалізується наступним чином. Перед початком контролю проводять калібрування контрольного приладу. Для цього на поверхню зразка з відомою твердістю металу встановлюють ЗП та ПП1... ППn, які розташовують послідовно на одній лінії в напрямку розповсюдження ультразвукових

імпульсів від ЗП. ПП1 фіксують від ЗП на відстані, що визначена за формулою

$$l_1 = (1, 2, \dots, 1, 5) \cdot C_r \cdot t_1,$$

де C_r – швидкість розповсюдження хвиль Релея, мм/мкс;

t_1 – загальний час дії зонduючого імпульсу та перехідних процесів в збуджуючому перетворювачі та елементах контрольного приладу, мкс.

При цьому прийнятий ПП1 імпульс повинен відокремлюватися в часі від зонduючого імпульсу. Далі ПП1 ... ППn розташовують так, щоб між сусідніми приймаючими перетворювачами відстань l була однаковою. Її величина визначається за виразом

$$l > C_r \cdot t,$$

де C_r – швидкість розповсюдження хвиль Релея, мм/мкс;

t – тривалість імпульсу прийнятих хвиль Релея, мкс.

При цьому сусідні імпульси (рис. 3а) n і m повинні відокремлюватися один від одного і різниця часу T , яка визначається за точками B перетину амплітуди A прийнятих імпульсів через нульове значення також повинна бути однаковою для двох сусідніх приймаючих перетворювачів. По завершенню процедури калібрування всі перетворювачі ЗП та ППІ ... ППІ_n фіксуються.

Відкалібрований контрольний пристрій встановлюється на ОК і реєструють новий час T' перетину величини амплітуди прийнятих імпульсів через нульове значення B (рис. 3б) для кожної пари приймаючих перетворювачів ППІ ... ППІ_n. Час перетину T' , для визначення локальної твердості поверхні виробу, визначається для кожного сусіднього приймаючого перетворювача, наприклад між ППІЗ і ППІ4. Вираховують різницю $T' - T$ за значенням якої визначають локальну твердість. Для визначення інтегральної твердості вираховують різницю часу $T' - T$ прийому імпульсів хвиль Релея для двох довільних перетворювачів, наприклад для ППІ і ППІ_n. Аналогічні операції контролю виконують при скануванні поверхні ОК відкаліброваним приладом контролю твердості.

Висновок. Таким чином використання розробленого способу дозволяє підвищити продуктивність контролю при його високій точності і локальності.

Список літератури

1. Revankar, G. (2003). "Introduction to hardness testing." Mechanical testing and evaluation, ASM Online Vol. 8.
2. И.Н. Ермолов, Ю.В. Ланге. *Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т.* Под общ. ред. В.В. Клюева. Т.3: *Ультразвуковой контроль*. М.: Машиностроение, 2004. 864 с.
3. Плеснецов С.Ю., Сучков Г.М., Корж А.И., Суворова М.Д. *Новые*

теоретические исследования и разработки в области электромагнитно-акустического преобразования. (Обзор). Техническая диагностика и неразрушающий контроль. 2018. №2. С. 24–31.

4. Плеснецов С.Ю., Сучков Г.М., Корж А.И., Суворова М.Д. *Новые теоретические исследования и разработки в области электромагнитно-акустического преобразования. (Обзор).* Техническая диагностика и неразрушающий контроль. 2018. №2. С. 24–31.
5. Плеснецов С.Ю., Сучков Г.М., Сергієнко Д.Ю. Патент №121134. *Спосіб ультразвукового контролю твердості металовиробу.* Опубл. 27.11.2017, Бюл. №22.
6. Плеснецов С.Ю., Мигущенко Р.П., Сучков Г.М., Юданова Н.М. *Спосіб ультразвукового контролю твердості металу протяжного виробу хвилями Релея.* Патент на корисну модель № 116249, G01N29/04. № u 2016 12507; заяв. 08.12.2016; надрук. 10.05.2017, Бюл. № 9/2017.

References (transliterated)

1. Revankar, G. (2003). "Introduction to hardness testing." Mechanical testing and evaluation, ASM Online Vol. 8.
2. Y.N. Ermolov, Ju.V. Langhe. *Nerazrushajushhyj kontrolj: Spravochnyk: V 7 t.* [Nondestructive testing: Handbok. In 7 volumes] Ed. V.V. Kljuev. T.3: *Ul'trazvukovoj kontrolj* [Volume 3. Ultrasonic testing] /. Moscow: Mashynostroenye, 2004. 864 p.
3. Plesnecov S.Ju., Suchkov Gh.M., Korzh A.Y., Suvorova M.D. *Novye teoreticheskiye issledovaniya y razrabotky v oblasti elektromagnitno-akusticheskogo preobrazovaniya. (Obzor)* [New theoretical research in the area of electromagnetic-acoustic transduction (Review)]. Tekhnicheskaja dyaghnostyka y nerazrushajushhyj kontrolj. 2018. No 2. P. 24–31.
4. Pliesnetsov S.Yu., Suchkov H.M., Serhiienko D.Yu. Patent №121134. *Sposib ultrazvukovoho kontroliu tverdosti metalovyrobu* [Method for ultrasonic teting of metal product hardness]. Publ. 27.11.2017, Bull. No 22.
5. Pliesnetsov S.Yu., Myhushchenko R.P., Suchkov H.M., Yudanov N.M. *Sposib ultrazvukovoho kontroliu tverdosti metalu protiazhnogo vyrobu khvyliamy Releia* [Rayleigh wave extended metal product ultrasonic hardness testing method]. Patent for a useful model No 116249, G01N29/04. № u201612507; request. 08.12.2016; printed. 10.05.2017, Bull. № 9/2017.

Надійшла (received) 25.10.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Плеснецов Сергій Юрійович (Плеснецов Сергей Юрьевич, Plesnetsov Sergey Yurievich) – кандидат технічних наук, докторант каф. КРСКД, НТУ «ХПІ»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8428-5426>; e-mail: s.plesnetsov@gmail.com